

## Рабочие процессы ДВС

пальных автобусах и мусороуборочных автомобилях. В Италии введен запрет на строительство АЗС без блока заправки природным газом.

### Заключение

1. Каждое из исследованных альтернативных топлив позволяют улучшить топливно-экологические показатели дизеля городского автобуса.

2. Наиболее высокая топливно-экологическая эффективность в эксплуатации обеспечивается при использовании в качестве топлива для дизеля городского автобуса компримированного природного газа. В качестве силовой установки для городского автобуса целесообразно применение газового двигателя.

3. Внедрение на городском автотранспорте газовых двигателей, работающих на природном газе, позволяет:

– обеспечить существенный вклад в проблему ресурсосбережения за счет снижения потребления де-

фицитных нефтяных моторных топлив;

– обеспечить значительный экономический эффект в результате снижения затрат на топливо и на возмещение экологического ущерба.

### Список литературы:

1. Парсаданов И. В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия: Монография. – Харьков: Издательский центр НТУ «ХПИ», 2003. – 244 с.
2. Парсаданов И.В., Кунах Е.А. Топливо-экологическая оценка дизеля городского автобуса с учетом условий эксплуатации. Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – №2.
3. Парсаданов И. В., Кричковская Л. В., Грицаенко И. В. Комплексная оценка экономико-экологических затрат при эксплуатации ДВС на разных территориях // Сборник научных статей XIV Международной научно-практической конференции. Том 1. – 2006. – С. 140 – 143.
4. Канило П.М., Костенко К.В., Сарапина М.В. Эколого-экономический анализ эффективности использования газообразных энергоносителей на автомобильном транспорте // Автомоб. транспорт. – Харьков: ХНАДУ. – 2007. – Вып. 21. – С. 98 – 107.

УДК. 629.113

*Г.П. Подзноев, канд. геол.-мин. наук, У.А. Абдулгазис, д-р техн. наук*

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ЦИКЛА Н-ДИЗЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ГИДРИДА АЛЮМИНИЯ

### Состояние проблемы.

Поиск альтернативных вариантов энергообеспечения транспорта ведется в различных направлениях. Наиболее перспективно использование в качестве энергоносителя водорода, ресурсы которого практически неисчерпаемы. Наиболее продвинутым выглядит вариант с топливными элементами, реализованный в моделях Honda-FCX и DM HyWire [2,3], в которых водород помещается в специальные сверхпрочные баллоны объемом 150 – 160 дм<sup>3</sup> под давлением 35 МПа. Масса H<sub>2</sub> при этом составляет

всего 4,5–4,9 кг (570 МДж), способных обеспечить лишь 400–450 км пробега. Также проблематична перспектива широко пропагандируемых биотоплив, являющихся теми же углеводородами с присущими им проблемами и требующих существенной реструктуризации агросектора, и так с трудом справляющегося с насущными запросами жизнеобеспечения.

### Пути решения проблемы

Одним из перспективных путей решения проблемы может стать использование ряда гидридов

металлов. Наиболее интересен в этом отношении гидрид алюминия ( $\text{AlH}_3$ ), в условном объеме которого ( $150 \text{ дм}^3$ ) содержится 22,2 кг водорода с энергопотенцией около 2665 МДж [1]. Наибольший энерговыход получается при гидролизе  $\text{AlH}_3$ . При этом из его первоначального объема в  $150 \text{ дм}^3$   $\text{AlH}_3$  можно получить уже 44,4 кг газообразного  $\text{H}_2$  с энергопотенцией 5370 МДж, что выше таковой для  $150 \text{ дм}^3$  бензина (5060 МДж). Кроме этого при гидролизе выделяется значительное количество тепловой энергии (16,0–18,0 МДж/кг  $\text{AlH}_3$ , или около 3700 МДж в варианте  $150 \text{ дм}^3$   $\text{AlH}_3$ ). Таким образом, полный энергопотенциал  $\text{AlH}_3$  может достигать 9000 МДж, что в 1,8 раза выше адекватного по объему бензина или в 15,8 раза выше,

чем в случае сжатого до 35 МПа водорода [4].

В работе [5] рассмотрен Концепт ДВС с использованием  $\text{AlH}_3$  (Н-Дизеля), в который перед адиабатным сжатием введен гидролиз  $\text{AlH}_3$ , дающим высокую температуру ( $\sim 3600^\circ\text{K}$ ) и давление 9,0 МПа. Столь высокие температура и давление уже в начале термодинамического цикла не могут быть приемлемы ни с технологической, ни с технической точки зрения. Сбалансировать в этом случае параметрические характеристики цикла Н-Дизеля с максималь-

ным приближением их к реальному циклу Дизеля возможно путем введения на гидролиз добавочной воды. Это позволяет существенно снизить температуру парогазовой фазы до приемлемых  $600\text{--}800^\circ\text{K}$  и повысить ее теплосодержание. В этом случае на стадии адиабатного сжатия поступает оптимально нагретая паро-водородная смесь под приемлемым давлением.

### Задачи исследований

В задачу исследований входило определение термодинамических характеристик цикла, которые, как и в обычных циклах ДВС, определяются начальной температурой, степенью сжатия ( $\epsilon$ ), показателем адиабаты ( $k$ ) и степенью предварительного расширения в процессе сгорания водорода. Также оценивалась зависимость рассчитанных значений параметров (температуры и давления), термического КПД ( $\eta$ ), и совершаемой работы ( $A$ ) от квоты добавочной воды, степени сжатия, степени регенерации теплоты и энергетического баланса цикла. Последний складывался из теплоты гидролиза ( $q_1'$ ), парциально приходящейся на парогазовую фазу и теплоты сгорания ( $q_1''$ ) водорода в камере сгорания двигателя (варианты 1-11 табл. 1 и 2).

Таблица 1. Результаты расчетных исследований. Варианты 1-12

|                        | 1            | 2            | 3            | 4            | 5            | 6            | 7            | 8            | 9            | 10           | 11           | 12           |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $\text{H}_2\text{O}_d$ | <b>0,0</b>   | <b>1,0</b>   | <b>2,0</b>   | <b>3,0</b>   | <b>4,0</b>   | <b>2,0</b>   | <b>3,0</b>   | <b>4,0</b>   | <b>3,0</b>   | <b>4,0</b>   | <b>5,0</b>   | -            |
| $q_{\text{гидр.}}$     | 1958         | 1958         | 1958         | 1958         | 1958         | 1958         | 1958         | 1958         | 1958         | 19578        | 1958         | -            |
| $q_1'$                 | <b>1104</b>  | <b>1785</b>  | <b>1861</b>  | <b>1892</b>  | <b>1908</b>  | <b>1861</b>  | <b>1892</b>  | <b>1908</b>  | <b>1892</b>  | <b>1908</b>  | <b>1919</b>  | -            |
| $q_1''$                | <b>3042</b>  | <b>3042</b>  | <b>3042</b>  | <b>3042</b>  | <b>3042</b>  | <b>3042</b>  | <b>3042</b>  | <b>3042</b>  | <b>3042</b>  | <b>3042</b>  | <b>3042</b>  | -            |
| $q_1$                  | <b>4146</b>  | <b>4827</b>  | <b>4903</b>  | <b>4934</b>  | <b>4950</b>  | <b>4903</b>  | <b>4934</b>  | <b>4950</b>  | <b>4934</b>  | <b>4950</b>  | <b>4961</b>  | <b>5083</b>  |
| $\epsilon$             | 5,0          | 5,0          | 5,0          | 5,0          | 5,0          | 10,0         | 10,0         | 10,0         | 15,0         | 15,0         | 15           | 17           |
| $t_2$                  | 3591         | 1207         | 844,1        | 689,5        | 604,7        | 844,1        | 689,5        | 604,7        | 689,5        | 604,7        | 549,3        | 298          |
| $t_3$                  | 5723         | 1859         | 1328         | 1099         | 971,7        | 1569         | 1313         | 1170         | 1444         | 1287         | 1180         | 850          |
| $t_4$                  | 7258         | 263          | 1842         | 1486         | 1282         | 2069         | 1691         | 1471         | 1817         | 1585         | 1431         | 2234         |
| $t_5$                  | 5536         | 1878         | 1276         | 1008         | 855,9        | 1145         | 910,6        | 778,6        | 853,8        | 730,9        | 650,8        | 1086         |
| $p_2$                  | 1,205        | 0,405        | 0,283        | 0,23         | 0,203        | 0,283        | 0,23         | 0,203        | 0,23         | 0,203        | 0,184        | 0,1          |
| $p_3$                  | 9,602        | 3,12         | 2,226        | 1,83         | 1,631        | 5,26         | 4,38         | 3,918        | 7,225        | 6,481        | 5,929        | 4,85         |
| $p_4$                  | 9,602        | 3,12         | 2,226        | 1,83         | 1,631        | 5,26         | 4,38         | 3,918        | 7,225        | 6,481        | 5,929        | 4,85         |
| $p_5$                  | 2,033        | 0,631        | 0,435        | 0,336        | 0,287        | 0,484        | 0,30         | 0,26         | 0,286        | 0,245        | 0,218        | 0,365        |
| $\eta$                 | <b>0.330</b> | <b>0.606</b> | <b>0.624</b> | <b>0.633</b> | <b>0.640</b> | <b>0.742</b> | <b>0.750</b> | <b>0.754</b> | <b>0.816</b> | <b>0.823</b> | <b>0.830</b> | <b>0.580</b> |
| $A$                    | <b>1368</b>  | <b>2925</b>  | <b>3059</b>  | <b>3123</b>  | <b>3168</b>  | <b>3638</b>  | <b>3700</b>  | <b>3732</b>  | <b>4026</b>  | <b>4074</b>  | <b>4117</b>  | <b>2948</b>  |
| $q_2$                  | <b>2777</b>  | <b>1903</b>  | <b>1847</b>  | <b>1809</b>  | <b>1781</b>  | <b>1263</b>  | <b>1235</b>  | <b>1217</b>  | <b>909</b>   | <b>875,2</b> | <b>845</b>   | <b>1983</b>  |

В таблице 1 и 2 даны:

$H_2O_d$  - добавочная вода на гидролиз (г);  $q$  гидр. – количество генерируемой при гидролизе теплоты (Дж);  $q_1^1$  - теплота гидролиза, вводимая в цилиндр перед адиабатным сжатием;  $q_1^2$  – количество теплоты, введенное за счет сгорания  $H_2$  в камере сгорания;  $q_1$  - суммарная теплота, введенная в процесс;  $\varepsilon$  - степень сжатия паро-водородной фазы;  $t_2$  - температура паро-водородной фазы перед адиабатным сжатием ( $^{\circ}K$ );  $t_3$  - температура после адиабатного сжатия ( $^{\circ}K$ );  $t_4$  – температура в конце сгорания ( $^{\circ}K$ );  $t_5$  – температура паро-газовой фазы в конце адиабатного расширения ( $^{\circ}K$ );  $p_2$  - давление перед адиабатным сжатием (МПа);  $p_3$  – давление в конце сжатия (МПа);  $p_4$  - давление в конце сгорания (МПа);  $p_5$  - давление паро-газовой фазы в конце адиабатного расширения (МПа);  $\eta$  – термический КПД;  $A$  – совершаемая работа;  $q_2$  – выводимая из цикла теплота.

Из таблицы и рис. 1 и 2 видно, что по мере увеличения добавочной воды количество вводимой в цикл теплоты  $q_1^1$  возрастает. При этом снижаются температура и давление. Причем, в начале адиабатного сжатия (жирная линия на рис.1) и процесса сгорания (жирный пунктир)  $t_2$  остается несколько выше, чем для традиционного Дизеля (вариант 12 на рис.1) за счет теплоты гидролиза, стабилизируясь для квоты добавочной воды в пределах 3-5 г на цикл. В конце адиабатного сжатия  $t_3$  выше, а в конце сгорания значительно ниже, чем у Дизеля. При этом видно закономерное увеличение температуры от  $\varepsilon$  (пунктир 1 для конца адиабатного сжатия и пунктир 2 для конца изобарного горения).

Несколько иная зависимость прослеживается для давления. При  $\varepsilon = 5$  оно значительно ниже такового для традиционного цикла, а для  $\varepsilon = 15$  - существенно выше. Также четко прослеживается понижение давления по мере увеличения количества добавочной воды и заметно повышается в зависимости от степени сжатия (пунктир 3). Для КПД характерно

устойчивое возрастание, как при увеличении квоты добавочной воды, так и, более четко, - от степени сжатия.

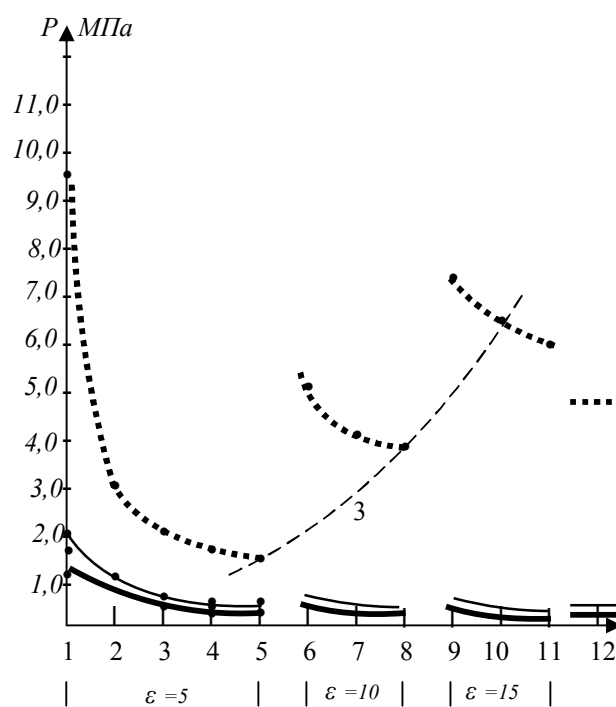


Рис. 2. Зависимость давления от количества добавочной воды и  $\varepsilon$  в цикле Н-Дизеля

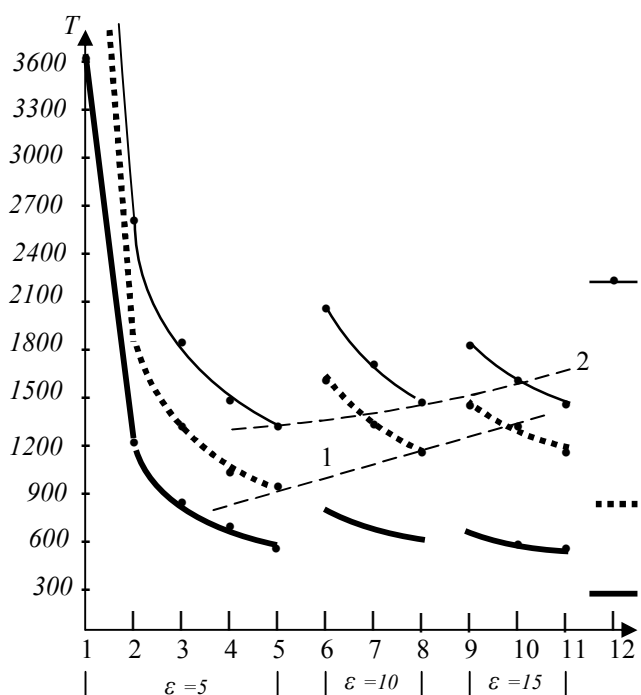


Рис. 1. Зависимость температуры от количества добавочной воды и  $\varepsilon$  в цикле Н-Дизеля

Таблица 2. Результаты расчетных исследований. Варианты 13-18

|                             | 13    | 14    | 16    | 17    | 18    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H <sub>2</sub> O            | 2,0   | 2,0   | 3,0   | 3,0   | 3,0   |
| q <sub>г</sub>              | 1958  | 1958  | 1958  | 1958  | 1958  |
| q <sub>пер</sub>            | 1500  | 2000  | 1500  | 2000  | 2500  |
| q <sub>1</sub> <sup>1</sup> | 3287  | 3751  | 3339  | 3816  | 4297  |
| q <sub>1</sub> <sup>2</sup> | 3042  | 3042  | 3042  | 3042  | 3042  |
| q <sub>1</sub>              | 6329  | 6793  | 6381  | 6858  | 7339  |
| ε                           | 10    | 10    | 10    | 10    | 10    |
| t <sub>2</sub>              | 1440  | 1672  | 1034  | 1207  | 1380  |
| t <sub>3</sub>              | 2477  | 2836  | 1856  | 2130  | 2377  |
| t <sub>4</sub>              | 2623  | 2985  | 2010  | 2291  | 2543  |
| t <sub>5</sub>              | 1548  | 1784  | 1147  | 1324  | 1504  |
| p <sub>2</sub>              | 0,60  | 0,70  | 6,4   | 6,9   | 8,5   |
| p <sub>3</sub>              | 10,4  | 11,8  | 11,4  | 12,2  | 14,6  |
| p <sub>4</sub>              | 10,4  | 11,8  | 11,4  | 12,2  | 14,6  |
| p <sub>5</sub>              | 0,63  | 0,745 | 0,71  | 0,76  | 0,93  |
| η <sub>t</sub>              | 0,715 | 0,786 | 0,732 | 0,787 | 0,826 |
| A                           | 4525  | 5340  | 4671  | 5397  | 6062  |
| q <sub>2</sub>              | 1803  | 1524  | 1712  | 1460  | 1274  |

Таким образом, можно определить наиболее комфортные для работы Н-Дизеля диапазоны изменения основных исходных показателей. Это - квота добавочной воды в количестве 3-4 г на цикл и степень сжатия 10-15. Для оптимизированных исходных показателей проведена серия расчетов по характеру влияния степени регенерации теплоты на основные параметры и конечные показатели цикла (табл. 2), отраженные на рис. 3 и 4. Из графиков видно, что регенерация теплоты особенно заметно влияет на снижение количества выводимой из цикла теплоты. Это приводит к существенному увеличению термического КПД цикла (варианты 13-18). При этом также возрастают значения температуры и, особенно, давления (рис. 3, вариант 12). Их оптимизация возможна за счет снижения квоты подаваемого в процесс АИЗ до уровня обеспечения количества совершаемой работы за цикл, аналогичной традиционному Дизелю.

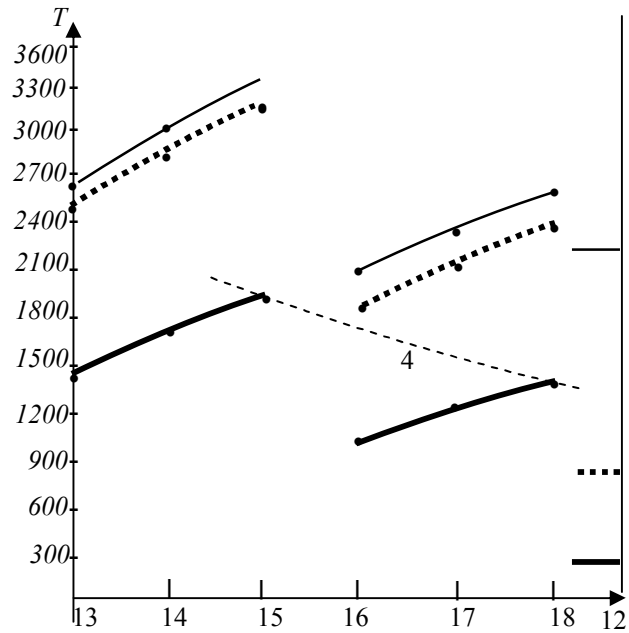


Рис. 3. Зависимость температуры от степени регенерации теплоты в цикле Н-Дизеля

Графическое отражение соотношений между основными характеристиками цикла Н-Дизеля (рис.4), показывают четко выраженное возрастание термического КПД и количества работы от увеличения степени сжатия, количества подаваемой на гидролиз добавочной воды и степени регенерации теплоты. При этом значения КПД в объеме и диапазоне проведенных расчетов могут достигать значений 0,8-0,83, что в идеале близко к термическому КПД регенеративного цикла Карно. Подобное допущение определяется особенностью цикла Н-Дизеля, связанной с резким доминированием паров воды в рабочем теле и возможностью ее конденсации в жидкую фазу. Последняя в теплообменнике поглощает часть выводимой теплоты и затем вновь направляется на гидролиз, циркулируя по замкнутой схеме и обеспечивая, тем самым, регенерацию теплоты. Отходящими продуктами при этом, что весьма важно, будут остаточная паровая фаза и азот – экологически безвредные вещества.

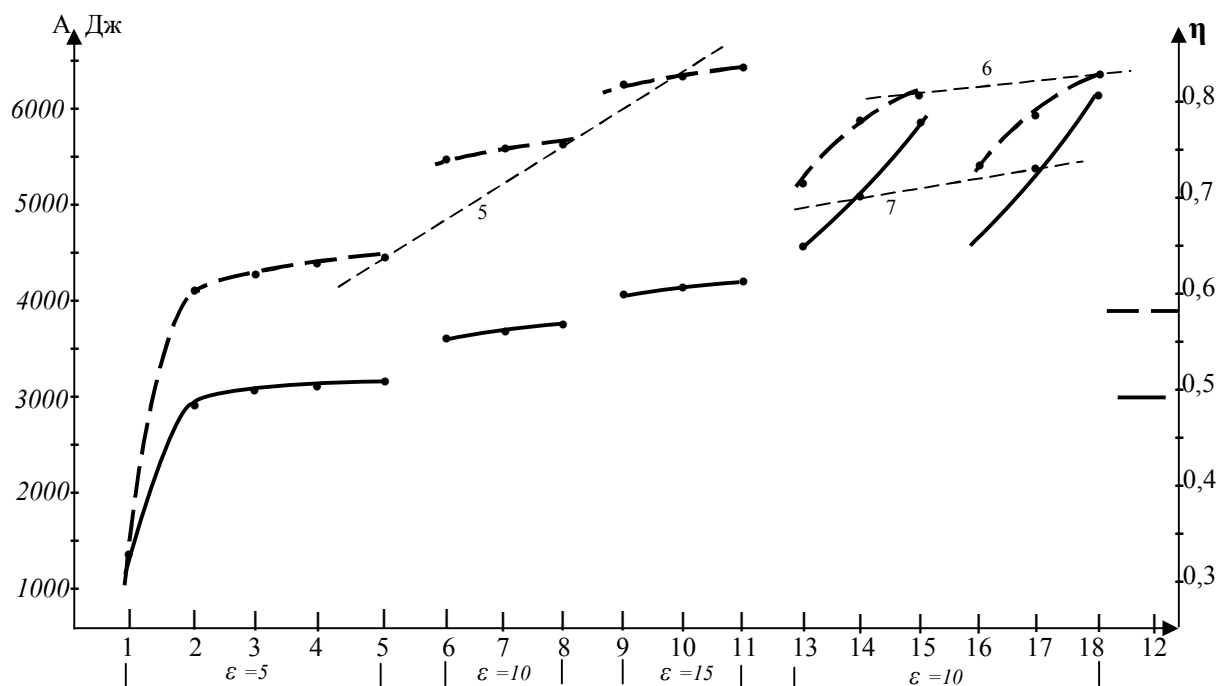


Рис. 4. Зависимость термического КПД  $\eta$  и количества работы  $A$  цикла от степени сжатия  $\varepsilon$ , количества добавочной воды и степени регенерации теплоты  $q_{рег}$  в цикле Н-Дизеля

### Выводы и рекомендации

Следующий этап исследований должно стать определение наиболее оптимальных соотношений основных термодинамических характеристик и параметров в рамках идеального цикла Н-Дизеля. На основании определения наиболее оптимальных вариантов работы цикла, можно начать исследования и расчеты основных конструктивных узлов и поиск компоновочной схемы Н-Дизеля.

Параллельно описанной выше схеме развития работ необходимы дополнительные исследования возможности расширения перечня перспективных металлогидридов, особенно на основе композиции гидридов Al, Na и Si, а также технологических схем их производства. Решение этой проблемы позволит получить наряду с регенерируемым после гидролиза  $Al_2O_3$ , практически неограниченную сырьевую базу

для многотоннажного производства металлогидридных энергоносителей, поскольку исходным сырьем для получения подобных комплексных металлогидридов будут весьма широко распространенные магматические породы щелочного ряда.

### Список литературы:

1. Гамбург Д.Ю., Семенов В.П., Дубовкин Н.Ф., Смирнова Л.Н. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. // Справочник. Москва. Изд-во Химия.- 1989. - 672 с.
2. Фомин А. Водородный фундамент. // Ж. За рулем. 2004. № 1.- С. 64 – 67.
3. Орлов Д. Теплота спасет мир. // Вокруг Света. - - 2003. № 2. - С. 67 – 73.
4. Подзноев Г.П. Абдулгасис У.А. Металлогидридные системы энергообеспечения транспорта. // Двигатели внутреннего сгорания.- Харьков: НТУ ХПИ.- 2004 г.- С. 32-36.
5. Подзноев Г. П., Абдулгасис У.А. Возможности повышения эффективности термодинамического цикла Дизеля путем использования альтернативного энергоносителя. // Двигатели внутреннего сгорания. Харьков: НТУ «ХПИ».- 2007. № 1. -С. 87-91.